
انجمن مهندسی روسازی ایران


انجمن بتن ایران

نشریه مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



ارزیابی اثرات فضایی عوامل تأثیرگذار محیطی بر فراوانی تصادفات درون شهری شیراز به روش بیز فضایی مبتنی بر فاصله اقلیدسی و همجواری*

مقاله پژوهشی

محمد صدیق باور[۱] علی نادران[۲] محمود صفارزاده[۳]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.80940.1213

چکیده عوامل محیطی ساخته شده یکی از مهمترین علت‌های تصادفات درون شهری است. در این مطالعات نشان داده است که علاوه بر داده‌های تصادف که دارای ناهمگونی فضایی هستند عوامل تأثیرگذار در تصادف نیز دارای همبستگی فضایی هستند. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی اثرات فضایی عوامل تأثیرگذار محیطی بر فراوانی تصادفات درون شهری شهر شیراز، ایران در سطح هر ناحیه ترافیکی می‌باشد. نتایج مطالعه نشان داد مدل‌های مبتنی بر فاصله و همجواری به منظور ارزیابی اثرات فضایی داده‌های تصادف و عوامل مؤثر بر آن در سطح هر ناحیه ترافیکی از دقت بیشتری نسبت به مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی برخوردار هستند. همچنین شاخص‌های تنوع کاربری اراضی و دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی تولید شده در گام اول در افزایش فراوانی تصادفات تأثیرگذار است و در هر ناحیه ترافیکی‌هایی که میزان این شاخص بالا باشد، احتمال رخداد تصادف بالاتری وجود دارد. در هیچ یک از مطالعات قبلی اثر توأمان عوامل محیطی تأثیرگذار دسته‌ای در برآورد فراوانی تصادفات درون شهری همچنین مقایسه بین مدل‌های آمار فضایی مبتنی بر ماتریس وزن‌دار جغرافیایی و مبتنی بر فاصله همجواری با رویکرد بیزی انجام نشده است؛ بنابراین لازم است در تصادفات درون شهری بررسی گردد. نتایج این مطالعه می‌تواند به منظور بهسازی اقدامات ایمنی درون شهری و همچنین برنامه‌ریزی توسعه و اقدامات آینده شهری برای مدیران و برنامه‌ریزان شهری حائز اهمیت باشد.

واژه‌های کلیدی عوامل محیطی، تصادفات درون شهری، اثر فضایی مبتنی بر همجواری، اثر فضایی مبتنی بر ماتریس فاصله، بیز فضایی.

Evaluating the Spatial Effects of Environmental Factors on Urban Crashes by Spatial Bayes Method

Mohammad Sedigh Bavar Ali Naderan Mahmoud Saffarzadeh

Abstract Built environmental factors are one of the most important causes of urban crashes. Studies have shown that in addition to crash data, which have spatial heterogeneity, factors influencing crashes also have a spatial correlation. The main goal of this study is to evaluate the spatial effects of environmental factors on the frequency of crashes in Shiraz, Iran, at the TAZ level. In the first step of the study, using component analysis models, important environmental factors affecting the crash were identified, and composite indicators were produced as independent variables. In the second step, to control the effect of correlation and heterogeneity of model variables, spatial statistical models based on Euclidean distance such as geographically weighted Poisson regression (GWPR), geographically weighted negative binomial distribution (GWNBR), as well as Poisson and distribution models Negative binomial based on neighbor distance is used in spatial Bayes method with INLA approach. The study's results showed that models based on distance and contiguity to evaluate the spatial effects of crash data and the factors affecting it at the TAZ level have higher accuracy than geographically weighted regression models, as well as indicators of land use diversity and access to the system. The public transport produced in the first step effectively increases the frequency of crashes, and in TAZs where this index is high, there is a higher probability of a crash. The results of this study can be important for city managers and planners to improve inner city safety measures, development planning, and future city measures.

Keywords Environmental factors, urban Crashes, spatial effect based on neighborhood, spatial effect based on distance matrix, spatial Bayes

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۱/۱۵و تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۲/۱۹ می‌باشد

(۱) پژوهشگر دکتری ،گروه تخصصی عمران راه و ترابری و حمل و نقل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، برنامه ریزی و مهندسی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Email: naderan@srbiau.ac.ir

(۳) استاد، برنامه ریزی و مهندسی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مقدمه

در سال‌های اخیر فراوانی و شدت جراحات ناشی از تصادفات ترافیکی درون شهری به عنوان یکی از بزرگترین علل مرگ و میر غیر طبیعی در کشورهای در حال توسعه رو به افزایش بوده است. بدین منظور اجرای اقدامات فوری توسط سازمان ملل متحد و سازمان جهانی بهداشت (۲۰۲۱-۲۰۳۰ دهه اقدامات ایمنی راه‌ها) به منظور ارتقا ایمنی راه‌ها و کاهش تلفات ناشی از حوادث ترافیکی در دستور کار قرار گرفته است و به دنبال آن محققان زیادی تا کنون به دنبال شناسایی عوامل تأثیرگذار در رخداد تصادفات با استفاده از بررسی عوامل محیطی از طریق مطالعات خردنگر و کلان‌نگر بوده‌اند [1].

از مهمترین عوامل محیطی تأثیرگذار (Environmental Influencing Factors (EIFs)) در رخداد تصادفات درون شهری، طراحی شهری است که شامل کاربری زمین، مبلمان خیابان، طرح هندسی و برخی شاخص‌های ترافیکی می‌باشد [1,2]. محیط ساخته شده می‌تواند تأثیر زیادی بر عوامل محیطی تأثیرگذار تصادف مانند حجم ترافیک، سرعت و برهم کنش وسایل نقلیه داشته باشد [1,3]. بنابراین، درک عوامل محیطی تأثیرگذار تصادفات درون شهری به منظور اتخاذ اقدامات متقابل مؤثر جهت کاهش تصادفات و در نتیجه بهبود ایمنی معابر درون شهری بسیار حائز اهمیت است [1,4]. به منظور درک و شناسایی بهتر EIFs تصادفات درون شهری، علاوه بر ویژگی-های هندسی، دموگرافی، ترافیکی و جمعیتی [5]، شاخص‌هایی چون اختلاط کاربری اراضی [6,7]، دسترسی به سیستم حمل و نقلی [8,9]، دسترسی به مشاغل [10]، به صورت جداگانه و با نگاه خردنگر مورد توجه محققان قرار گرفته است.

به منظور شناسایی چگونگی تأثیر هر یک از EIFs تصادفات درون شهری در بیشتر مطالعات گذشته از روش‌های جهانی غیرمکانی با فرض ثابت بودن ضرایب متغیرهای مستقل چون OLS [11]، رگرسیون خطی چند متغیره [12]، توزیع پواسون و دو جمله‌ای منفی [13,14]، مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی و سایر مدل‌های پیشگو [15,16] استفاده شده است. در مدل‌های جهانی غیر فضایی فرض می‌شود، تمامی متغیرهای تأثیرگذار در رخ داد تصادف از یکدیگر مستقل هستند (عدم همبستگی فضایی)، بنابراین در صورت وجود همبستگی فضایی نتایج برآورد مدل‌های جهانی غیرقابل اعتماد است [1,17].

بنابراین به منظور غلبه بر همبستگی فضایی بین متغیرهای مدل از روش‌های آمار فضایی مبتنی بر ماتریس وزن‌دار (Spatial Weighted (SW)) و فاصله اقلیدسی چون روش‌های مبتنی بر GIS [18,19]، روش‌های GWR و GWPR [17]، روش‌های GTWR OLS و MGWR [20]، مبتنی بر تخمین چگالی کرنل و K-Funktion [17] و مدل‌های آمار فضایی مبتنی بر ماتریس همجواری (Spatial Adjacency(SA)) استفاده گردیده است [21,22]. مطالعات اخیر نشان داده است علاوه بر موارد مذکور یکی از روش‌های پرداختن به مدل‌سازی تصادف در سطح کلان، اتخاذ یک رویکرد مدل‌سازی سلسله مراتبی بیزی است [15,23]. خودهمبستگی فضایی در مدل‌های بیزی با استفاده از یک توزیع تصادفی، توزیع‌های احتمال قبلی خود رگرسیون شرطی (CAR) را با استفاده از چارچوب سلسله مراتبی اندازه‌گیری می‌کند.

هدف این مطالعه بررسی ابعاد EIFs تصادفات درون شهری به روش بیز فضایی مبتنی بر فاصله اقلیدسی و همجواری می‌باشد. به منظور نیل به این هدف شکاف‌های تحقیقاتی مطالعات گذشته به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

۱) بررسی ارتباط بین فراوانی تصادفات EIFs متغیرهای دسته اول (عوامل محیطی مشاهده شده) و دسته دوم (شاخص‌های به دست آمده از روش PCA) به صورت یکپارچه.

۲) شناسایی بهترین مدل فضایی جهت برآورد فراوانی تصادفات درون شهری با استفاده از دو رویکرد ۱) مدل رگرسیون پواسون و توزیع دوجمله‌ای منفی وزن‌دار جغرافیایی با استفاده از فاصله اقلیدسی با رویکرد بیز تجربی و ۲) مدل رگرسیون پواسون و توزیع دوجمله‌ای منفی فضایی با استفاده از فاصله همجواری با مدل بیزی و رویکرد INLA.

در هیچ یک از مطالعات قبلی اثر توأمان EIFs های دسته‌ای در برآورد فراوانی تصادفات درون شهری، همچنین مقایسه بین مدل‌های آمار فضایی مبتنی بر ماتریس وزن‌دار جغرافیایی و مبتنی بر فاصله همجواری با رویکرد بیزی انجام نشده است. بنابراین لازم است در تصادفات درون شهری بررسی گردد که اثر همبستگی مکانی بین عوامل محیطی فراوانی تصادفات با کدامیک از رویکردهای آمار فضایی قابل کنترل است. این مطالعه با هدف ارزیابی اثرات فضایی عوامل تأثیرگذار محیطی بر فراوانی تصادفات درون شهری شیراز به روش بیز فضایی مبتنی بر فاصله اقلیدسی و همجواری و استفاده از این چارچوب برای مدل‌سازی تصادفات

ماکروسکوپی درون شهری به منظور یافتن تکنیک مدل‌سازی مناسب، که می‌تواند نتایج قابل اعتمادتر و دقیقتری تولید کند، انجام شده است.

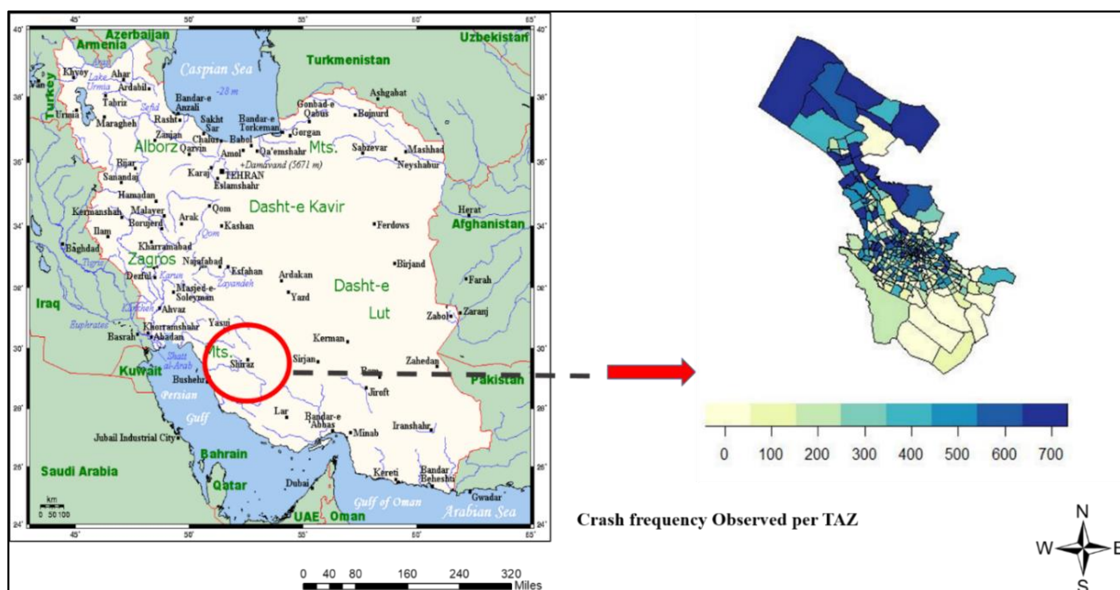
محدوده مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

محدوده مورد مطالعه. شهر شیراز از لحاظ جغرافیایی در جنوب غربی ایران و در بخش مرکزی استان فارس قرار دارد. جمعیت شهر شیراز براساس آخرین سرشماری ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران بیش از ۱,۵میلیون نفر می‌باشد. این شهر در موقعیت جغرافیایی (29.7323°N, 52.6351°E) قرار گرفته است. ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵۹۰ متر می‌باشد. مساحت این شهر ۱۲۹۹۰ کیلومتر مربع است که طول آن ۹۰ و عرض آن از ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر، متغیر است (شکل ۱).

ساختار متغیرها و منابع آن. داده‌های این مطالعه به صورت GIS-Base در محدوده مورد مطالعه تهیه گردیده است در این مطالعه EIFs متشکل از دو دسته است. دسته اول شامل متغیرهای مشاهداتی محیطی و دسته دوم شامل چند شاخص ترکیبی مانند شاخص تنوع کاربری، شاخص دسترسی به مشاغل و شاخص دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی که از روابط (۱ و ۲) به دست می‌آیند.

در تحلیل کلانگر داده‌های تصادفات درون شهری در این مطالعه از مجموع فراوانی تصادفات در سطح نواحی ترافیکی کل شهر شیراز به عنوان متغیر وابسته استفاده شده است [3]. اطلاعات متغیر وابسته به صورت مکانی و GIS-Base از معاونت حمل و نقل و ترافیک شهر شیراز(Transport and Traffic Deputy(TATD)) که متولی جمع‌آوری داده‌های تصادف درون شهری است دریافت گردیده است. این داده‌ها مربوط به بازه زمانی سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ بوده که در مجموع ۳۴۵۸۸ تصادف (فوتی، جرحی و خسارتی) گزارش شده است. پراکندگی تصادفات شیراز با استفاده از آمار تصادفات پلیس راهور در شکل (۱) نشان داده شده است.

براساس پیشنهاد مطالعات [24,25]، مهمترین EIFs تصادفات درون شهری در دسته اول شامل کاربری اراضی [25]، جمعیت [26]، ویژگی‌های ترافیکی چون سرعت متو سط، متوسط عرض خط، متوسط ت عداد خط، ت عداد ای ستگاه های اتوبوس می‌باشند. شاخص‌های ترکیبی تأثیرگذار در تصادف درون شهری مانند اختلاط کاربری اراضی، دسترسی به حمل و نقل عمومی و دسترسی به مشاغل و فراوانی تصادفات درون شهری در برآورد فراوانی تصادفات درون شهری کمتر مورد محققان قرار گرفته است. محاسبه شاخص‌های تأثیرگذار در رخداد تصادف نیازمند اطلاعات اضافی چون فاصله یا هزینه سفر بین نواحی است که ممکن است در دسترس محققان نباشد، جهت مشاهده جزئیات شاخص‌ها به روابط (۱و۲) مراجعه گردد.



شکل ۱ فراوانی تصادفات در نواحی ترافیکی شیراز

در این مطالعه لایه‌های اطلاعاتی متغیرهای مستقل براساس هر ناحیه ترافیکی می‌باشد که شامل عوامل محیطی و جمعیتی شهری شامل کاربری‌های اراضی و جمعیت شهر شیراز از معاونت شهرسازی شهر شیراز تهیه گردیده است. اطلاعات توصیفی داده‌های این مطالعه در جدول (۱) نشان داده شده است. شهر شیراز دارای ۳۲۵ ناحیه ترافیکی می‌باشد و تنوع کاربری‌های اراضی در آنها براساس مطالعات طرح جامع حمل و نقل به ۳۷ دسته تقسیم‌بندی شده است که به منظور کاهش خودهمبستگی بین متغیرها به ۱۴ دسته شامل: شبکه معابر، تعداد واحد مسکونی، تعداد واحد تجاری، فرهنگی و مذهبی، ورزشی، آموزشی، بهداشتی درمانی، فضای سبز و مزارع، اداری ستادی، صنایع و تأسیسات و حمل و نقل، بایر و مخروبه، مختلط مسکونی و غیر مسکونی، مختلط غیر مسکونی، سایر کاربری‌ها دسته‌بندی شدند و به منظور یافتن شاخص تنوع کاربری مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور کنترل همبستگی بین متغیرهای مستقل از آزمون پیرسون استفاده گردیده است [27]. بنابراین در آزمون همبستگی پیرسون تنها از متغیرهایی که مستقیما وارد مدل می‌شوند، استفاده شده است (جدول ۱).

جدول ۱ اطلاعات توصیفی متغیرهای مطالعه

	متغیرها	علامت اختصاری	حداقل	حداکثر	میانه	Interquartile Range
متغیر وابسته	تعداد تصادفات	CR	7.00	686.00	85.00	72.00
متغیرهای مستقل	شبکه معابر	-	0.00	73.34	24.49	30.25
کاربری اراضی	مسکونی	-	0.00	70.18	30.21	24.26
	فرهنگی-مذهبی- جهانگردی	-	0.00	30.66	1.34	2.12
	بهداشتی-درمانی	-	0.00	84.45	0.97	1.62
	ورزشی	-	0.00	35.18	0.41	0.51
	اداری ستادی	-	0.00	87.83	1.71	1.26
	فضای سبز و مزارع و دامداری	-	0.00	86.59	7.43	4.62
	تجاری	-	0.00	30.44	2.06	2.09
	تأسیسات، صنایع و حمل و نقل	-	0.00	94.26	3.36	4.62
	بایر و متروکه	-	0.00	94.31	12.17	11.95
	آموزشی	-	0.00	73.30	2.42	3.6
	مختلط مسکونی و غیر مسکونی	-	0.00	14.16	2.05	2.9
	مختلط غیر مسکونی	-	0.00	36.37	0.59	0.92
	سایر کاربری	-	0.00	100.00	10.78	9.8
ویژگی ترافیکی	ایستگاه اتوبوس	BS	0.00	21.00	4.00	4.00
	تعداد تقاطعات	IN	0.00	13.00	4.00	3.00
	متوسط سرفاصله زمانی(min)	HD	0.05	0.80	9.15	4.00
	متوسط سرعت(km/h)	AV	20.00	49.61	19.26	2.50
	متوسط طول(km)	ALE	0.128	2.50	0.261	0.107
	متوسط زمان سبز(min)	AG	0.00	2.64	0.885	0.445
جمعیت شناسی	لگاریتم جمعیت	LP	1.00	4.00	3.5	0.625
هندسه مسیر	متوسط عرض(m)	AW	2.50	3.50	2.00	8.85
	متوسط تعداد خط	AL	1.00	4.00	2.00	1.00
شاخص تنوع کاربری اراضی	براساس رابطه (۱)	LUI	>0.001	0.835	0.617	0.160
شاخص دسترسی به مشاغل	براساس رابطه (۲)	JI	7.77	8.25	7.82	0.120
شاخص دسترسی به حمل و نقل عمومی	براساس رابطه (۲)	PTI	6.93	8.00	7.05	0.189

روش‌شناسی مطالعه

در این مطالعه ابتدا متغیرهای دسته دوم EIFs تصادف چون شاخص تنوع نوع کاربری (تابعی از ۱۴ دسته کاربری اراضی است)، شاخص دسترسی به مشاغل (تابعی از فاصله بین نواحی و تراکم کاربری تجاری و ادرای است) و شاخص دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی (تابعی از تعداد ایستگاه‌های اتوبوس و فاصله بین نواحی است) برای هر یک از ناحیه‌های ترافیکی محاسبه می‌گردد و پس از بررسی PCA به همراه دسته اول EIFs تصادفات وارد مدل می‌شوند. در ادامه با استفاده از ۴ مدل آمار فضایی GWPR و GWNBR مبتنی بر ماتریس فاصله جغرافیایی با ضرایب متغیر برای هر ناحیه ترافیکی و نیز مدل-های SAP و SANB با رویکرد مدل بیز فضایی و روش INLA فراوانی تصادفات درون شهری برآورد می‌گردد.

شاخص تنوع کاربری. با استنتاج از روش مطالعات شاخص تنوع کاربری اراضی به صورت مجموع نسبت مساحت هر کاربری ضرب در لگاریتم طبیعی آن؛ تقسیم بر مجموع مساحت کل کاربری‌ها محاسبه می‌گردد که شاخص آنتروپی (Entropy Index) نامیده می‌شود. سپس مقدار به دست آمده بین ۰ و ۱ مقیاس‌بندی می‌شود، به طوری که ۱، تنوع کاربری کامل زمین و ۰ ، تنوع کاربری زمین یا تنها یک نوع کاربری زمین خواهد بود.

$$LUI\,(Entropy-Index)=\sum_{i=1}^{n}p_i\,\log(p_i)/\log(N) \quad (۱)$$

در رابطه (۱) LUI شاخص آنتروپی تنوع کاربری زمین، p_i درصد مساحت کاربری i در TAZi و N مجموع کل مساحت‌ها می‌باشد [28].

شاخص دسترسی به مشاغل و سیستم حمل و نقل عمومی. با استنتاج از این روش شاخص‌ها از رابطه (۲) به دست می‌آیند.

$$PTI=\sum_{j=1}^{n}O_j\,f\,(c_{ij})/O \quad (۲)$$

در رابطه (۲) O_j میزان فرصت‌های موجود در مقاصد (شامل مساحت مجموع کاربری‌های غیر مسکونی در هر TAZ) و c_{ij} هزینه سفر (در این مطالعه فاصله بین مراکز TAZ) بین ناحیه مبدأ و مقصد براساس تابع f می باشد.

شناسایی متغیرهای مهم در مدل با استفاده از روش (PCA). هدف روش تحلیل مؤلفه اصلی (Principal Component Analysis (PCA)) فشرده‌سازی اندازه است؛ مجموعه داده‌ها با استخراج مهمترین اطلاعات از جدول داده‌ها ساختار مشاهدات و متغیرها تجزیه و تحلیل می‌شوند و سپس متغیرهای جدیدی به نام مؤلفه‌های اصلی محاسبه می‌گردند و به صورت ترکیب خطی از متغیرهای اصلی به‌دست می‌آیند. بدین منظور جهت بررسی و انتخاب متغیرهای مستقل و همچنین تأثیر شاخص-های نوع کاربری، دسترسی به مشاغل و دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی به همراه سایر متغیرها در مدل از روش GLM و Tobit استفاده شده است.

مدل خطی تعمیم یافته. مدل‌های خطی عمومی (GLM) یک کلاس کلی از مدل‌های آماری است که شامل بسیاری از مدل‌های متداول با ویژگی‌های خاص است. معادله GLM به صورت رابطه (۳) است [29]:

$$Y=\sum_{i=1}^{m}\beta_i\chi_i+\varepsilon_i \quad (۳)$$

در رابطه (۳) Y پیش‌بینی خطی و εi پارامتر خطا است. در مدل خطی تعمیم یافته، فرضیات توزیع مستقل و نرمال در رابطه y آورده شده است. این توزیع شامل مواردی از قبیل توزیع عادی، پواسون، گاما و دوجمله‌ای است.

مدل توبیت. در این تحقیق به منظور حذف هرگونه پیش‌بینی منفی از تصادف عابر پیاده، از مدل Tobit برای شناسایی معیار رویارویی استفاده شد. مدل Tobit یک مدل آماری است که برای توصیف رابطه بین یک متغیر وابسته غیرمنفی yi و یک متغیر مستقل (یا برداری) xi مورد استفاده قرار می‌گیرد که به شکل رابطه (۴) نشان داده شده است:

$$y_i^*=\beta\chi_i+\varepsilon_i \quad i=1,2,\ldots\ldots N$$

$$y_i=\begin{cases}y_i^* & if \quad y_i^*>0\\ 0 & if \quad y_i^*\le 0\end{cases} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) * yi یک متغیر پنهان است که فقط در صورت مثبت مشاهده می‌شود. همچنین N تعداد مشاهدات، yi متغیر وابسته ، xi یک بردار متغیرهای توضیحی، β یک بردار پارامترهای قابل تخمین و εi یک توزیع عادی و مستقل است. پارامتر خطا نیز دارای میانگین صفر و واریانس σ2 می‌باشد.

مدل‌های فضایی مبتنی بر ماتریس وزن‌دار جغرافیایی. مدل‌های آمار فضایی مبتنی بر ماتریس وزن‌دار جغرافیایی؛ همبستگی بین متغیرهای مدل را براساس ماتریس فاصله اقلیدسی بین مراکز نواحی ترافیکی در نظر می‌گیرد، به گونه‌ای که نواحی نزدیکتر به ناحیه i تأثیر بیشتری در برآورد ضرایب متغیرهای مستقل در ناحیه i دارند و برعکس. بنابراین ضرایب متغیرهای مستقل در همه TAZها یکسان نیست. مهمترین مدل‌های برآورد فراوانی تصادفات درون شهری مدل‌های GWPR و GWNBR می‌باشند.

در این مطالعه به منظور برآورد فراوانی تصادفات درون شهری براساس متغیرهای مستقل محیطی در حالت جغرافیایی ابتدا از مدل GWPR استفاده شده است. در یک مدل GWPR، فراوانی تصادف توسط مجموعه‌ای از متغیرهای توصیفی پیش‌بینی می‌شود که در آن پارامترها مجاز به تغییر در فضا هستند. این مدل را می‌توان به صورت رابطه (۵) نوشت.

$$\ln(\lambda_i) = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)\ln(E_{vi}) + \sum_{k=1}^{k} \beta_k(u_i, v_i) x_{ij}$$

(۵)

در رابطه (۵) λ_i فراوانی تصادفات پیش‌بینی شده در ناحیه i و (u_i, v_i) مختصات ناحیه i را مشخص می‌کند. همچنین β_0 ثابت مدل برای هر موقعیت و x_{ij} متغیر توضیحی i در ناحیه j می‌باشد. لازم به ذکر است که در GWPR، $\beta_k(u_i, v_i)$ تابعی از مختصات مرکز ناحیه i است.

به استنتاج مطالعه [30]، روش تخمین GWNBR داده‌های گسسته را به روشی غیر ثابت مدل می‌کند و بیش پراکندگی داده‌ها را در مدل لحاظ می‌کند، همچنین فرض عدم برابری واریانس و میانگین پیش فرض این مدل است. بنابراین با توجه به ماهیت بیش پراکندگی داده‌های تصادف، این مدل ممکن است دقت پیش‌بینی بالاتری داشته باشد. معادله (۶) شکل کلی مدل GWNBR را نشان می‌دهد:

$$\lambda_j \sim NB\left[t_j \exp(\textstyle\sum_k \beta_k(u_j, v_j) x_{jk}), \alpha(u_j, v_j)\right]$$

(۶)

در رابطه (۶) λ_j فراوانی تصادفات پیش‌بینی شده؛ (u_j, v_j) مختصات مرکز ناحیه j برای j = 1,2,….,n همچنین tj یک متغیر جبران کننده (offset) در ناحیه j، α پارامتر بیش پراکندگی، β_k ضریب متغیر توضیحی x_{jk} برای k = 1,2,….K می‌باشد.

مدل‌های بیز فضایی مبتنی بر فاصله همجواری (با رویکرد INLA). استنتاج بیزی بر اساس توزیع احتمال پارامترهای EIFs تصادف با توجه به داده‌ها در یک محیط سلسله مراتبی است. اصطلاح سلسله مراتبی به مدل‌سازی مرحله‌ای داده‌های مشاهده شده اشاره دارد، به طوری که آنها مشروط به مجموعه‌ای از پارامترها هستند که خود از نظر پارامترهای دیگر مشخصات احتمالی داده می‌شوند. در این مطالعه از روش بیزی تقریب لاپلاس تودرتو یکپارچه (INLA) برای استنباط به عنوان یک رویکرد شناخته شده معرفی شده توسط روله و همکاران استفاده شده است. در مدل‌های بیز فضایی با رویکرد INLA؛ برآورد ضرایب متغیرهای توضیحی براساس همجواری ناحیه i با سایر نواحی انجام می‌گیرد با اعمال اثر فضایی صورت می‌گیرد به گونه‌ای که اگر ناحیه i با j دارای مرز مشترک نباشد؛ ناحیه j تأثیری در برآورد ضرایب متغیرهای توضیحی ناحیه i ندارد [31].

مدل رگرسیون ساده پواسون و توزیع دوجمله‌ای منفی هر دو از خانواده مدل‌های خطی تعمیم یافته [illegible] برای مدل رگرسیون ساده، فرض می‌شود [illegible] بردار پاسخ برای n مشاهده تصادف و $\boldsymbol{x_i} = (x_{1i}, \dots, x_{pi})$ بردار p–بعدی توضیحی برای هر یک از مشاهدات است. بنابراین، برای تعریف مدل GLM با متغیر پاسخ، فرض می‌کنیم که میانگین متغیر پاسخ E(y) با پیش‌بینی‌کننده خطی متغیرهای توضیحی با تابع پیوند مناسب مرتبط است. از متغیرهای توضیحی پیش‌بینی کننده خطی با اثر همجواری فضایی به صورت رابطه (۷) می‌باشد.

$$\eta_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^{p} x_{ij}\beta_j + \sum_{k=1}^{K} f\ (z_k) + \varepsilon_i$$

(۷)

در رابطه (۷) β_0 ثابت مدل و β_j ضرایبی هستند که نشان دهنده اثر خطی متغیرهای کمکی x_{ij} هستند. $f\ (z_k)$ توابعی از متغیرهای کمکی z_k هستند که برای ملایم کردن این روابط خطی یا معرفی اثرات تصادفی استفاده می‌شوند و ε_i جزء خطای بدون ساختار (یعنی فاقد ساختار فضایی یا سریالی) است.

از آنجایی که برخی از عوامل مکانی در وقوع تصادف مؤثرتر هستند همچنین در بسیاری از موارد داده‌های تصادف یک وابستگی منطقه‌ای فضایی دارند به این معنی که هر منطقه رفتاری وابسته با همسایگان خود دارد. بنابراین در این مطالعه یکی از مفروضات ساختار فضایی رایج برای داده‌های منطقه‌ای، مدل خودرگرسیون شرط [illegible] است. از مدل CAR ذاتی (ICAR) برای محاسبه وابستگی ف[illegible] ده است. اکنون، مدل ICAR با فرض $\mathbf{z} = (z_1, \ldots, z_n)'$ به عنوان بردار متغیرهای توضیحی فضایی به طور خلاصه به صورت رابطه (۸) است.

$$f\ (z_i \,|z_{i-1}), \sigma_z^{\ 2} \sim N\left(\frac{1}{|\delta_i|}\sum_{j\in\delta_i} z_j, \frac{\sigma_z^{\ 2}}{|\delta_i|}\right),$$

(۸)

در رابطه (۸) z_i تمام اعضای بردار z به جز شماره آن است. δ_i مجموعه همسایه‌ها برای همسایگان ناحیه i و $|\delta_i|$ اندازه مجموعه است. همچنین $\sigma_z^{\ 2}$ پارامتر واریانس مدل ICAR است.

ارزیابی و اعتبار سنجی مدل‌ها. در این مطالعه، از سه معیار به عنوان خوب بودن برازش (criteria as a goodness of fit (GOF) و دقت پیش‌بینی بر اساس مطالعات ساها و همکاران استفاده شده است. معیار (Deviance Information Criteria) DIC یکی از مهمترین معیارهایی است که برای ارزیابی مدل رگرسیون ساده پواسون و توزیع دو جمله‌ای منفی در مطالعات گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. DIC تعمیم معیارهای اطلاعاتی Akaike است که توسط ارائه شده است و یک معیار بیزی از پیچیدگی خاصی برخوردار است. DIC را می‌توان به صورت رابطه (۹) تعریف کرد:

$$DIC = D(\hat{\theta}) + 2\rho D = \bar{D} + \rho D \qquad (۹)$$

در رابطه (۹) $D(\hat{\theta})$ انحراف با استفاده از مقادیر میانگین خلفی (posterior) پارامتر مورد نظر است، $\bar{D}$ میانگین خلفی انحرافات و ρD تعداد مؤثر پارامترها در مدل است. در این مطالعه همچنین از (Watanabe-Akaike information criterion)WAIC که یکی دیگر از معیارهای بیزی جهت شناسایی مدل ارج تر است، استفاده گردیده است. در نها یت از RMSE (Root Mean Square Error) به R^2 در جهت محاسبه ریشه میانگین مربعات (Median absolute deviation)، خطای فراوانی تصادفات استفاده شده است.

نتایج مدل‌سازی و بحث

اطلاعات توصیفی داده‌ها. از سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ در مجموع (فوتی، جرحی، خسارتی) تعداد ۳۴۵۸۸ تصادف در شهر شیراز گزارش شده است که به طور متوسط در هر ناحیه ترافیکی ۱۰۶ تصادف (حداقل ۷ و حداکثر ۶۸۶) در ۳۲۵ ناحیه ترافیکی اتفاق افتاده است.

در این مطالعه به منظور نشان دادن میزان پراکندگی داده-های مطالعه از آماره دامنه میان چارکی استفاده گردیده است، که نشان می‌دهد پارامتر فراوانی تصادفات دارای پراکندگی زیاد در محدوده مورد مطالعه است. همچنین متغیر تعداد ایستگاه‌های اتوبوس و متوسط عرض معبر دارای پراکندگی بیشتری نسبت به سایر متغیرهای مدل هستند.

جدول (۲) نتایج مدل‌های GLM و Tobit نشان داده شده است که براساس آن فشرده‌سازی داده‌ها و تولید شاخص‌های تنوع نوع کاربری، دسترسی به مشاغل و سیستم حمل و نقل عمومی در مدل نتایج مناسبتری را به دنبال دارد. بنابراین در این مطالعه از دو دسته متغیر EIFs تصادف درون شهری استفاده شده است. دسته اول شامل متغیرهایی هستند که به طور مستقیم در برآورد فراوانی تصادف درون شهری در مقیاس TAZ تأثیر گذارند (جدول ۱: جمعیت، ایستگاه اتوبوس، تقاطعات، سرفاصله زمانی، متوسط سرعت، متوسط عرض معبر، متوسط طول معبر، متوسط تعداد خط، سرفاصله زمانی، متوسط زمان

سبز) و دسته دوم شاخص‌هایی هستند که به طور غیر مستقیم در رخداد تصادفات تأثیر گذارند (شاخص تنوع کاربری، شاخص دسترسی به مشاغل و شاخص دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی)، این شاخص‌ها براساس روابط (۱ و ۲) محاسبه گردیده‌اند.

جدول ۲ نتایج آزمون انتخاب متغیرها

Model Type	MAD	RMSE
GLM Using All Variables	45.64	77.41
GLM Using PCA Variables	25.21	61.16
Tobit Using All Variables	45.62	42.96
Tobit Using PCA Variables	17.91	25.49

جدول (۳) همبستگی خطی پیرسون بین جفت متغیرهای مستقل مدل را نشان می‌دهد که براساس آن بالای ۹۰ درصد از متغیرهای مستقل با یکدیگر همبستگی خطی کمتر از ۴۰ درصد دارند. براساس مطالعات گذشته مقدار ضریب همبستگی پیرسون معادل ۵۰ درصد به عنوان آستانه همبستگی قوی در نظر گرفته شده است که در این مطالعه رؤیت نگردید.

جدول ۳ همبستگی بین متغیرهای دسته اول

Variables	Correlation	BS	AH	AS	ALE	AL	AW	LS	AG	IN	LUI	JI	PTI
BS	Pearson	1											
	Sig. (2-tailed)												
AH	Pearson	.28**	1										
	Sig. (2-tailed)	.000											
AS	Pearson	.100	.530**	1									
	Sig. (2-tailed)	.072	.000										
ALE	Pearson	.039	.306**	.055	1								
	Sig. (2-tailed)	.486	.000	.321									
AL	Pearson	.13*	.173**	.175**	.097	1							
	Sig. (2-tailed)	.012	.002	.002	.080								
AW	Pearson	.22**	-.056	.100	-.060	.47**	1						
	Sig. (2-tailed)	.000	.316	.071	.278	.000							
LS	Pearson	.24**	-.142*	-.078	-.528**	.071	.277**	1					
	Sig. (2-tailed)	.000	.010	.159	.000	.204	.000						
AG	Pearson	.055	-.131*	.047	-.289**	.010	.448**	.183**	1				
	Sig. (2-tailed)	.325	.018	.394	.000	.851	.000	.001					
IN	Pearson	.26**	-.008	.088	-.182**	.13*	.156**	.201**	.097	1			
	Sig. (2-tailed)	.000	.885	.112	.001	.015	.005	.000	.079				
LUI	Pearson	.005*	-.131*	.041	.189**	.011	.147**	.103**	.110	.421**	1		
	Sig. (2-tailed)	.004	.003	.044	.000	.051	.000	.001	.071	.000	.000		
JI	Pearson	.021	.478**	.133**	.189**	.210	.038**	.123**	.011	.218**	.128**	1	
	Sig. (2-tailed)	.151	.000	.001	.000	.151	.001	.001	.351	.001	.001		
PTI	Pearson	.210	.403**	.111**	-.211**	.013	.118**	.113**	.019	.028**	.421**	.448**	1
	Sig. (2-tailed)	.151	.001	.001	.001	.351	.000	.001	.851	.000	.000	.000	
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).													
*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).													

جدول ۴ نتایج مدل‌سازی به روش GWPR و GWNBR

	GWPR Model Result							
Variables	Mean. Est.	Min. Est.	Max. Est.	Rang	Lwr. Est.	Upr. Est.	Delta	Non-Stationary Test
Intercept	4.4183*	3.9377	5.0136	1.0759	4.2651	4.5442	0.279	Yes
Bus	0.1485*	-0.294	0.6556	0.9496	0.0209	0.2541	0.233	Yes
AH	-0.0973**	-0.6145	0.2568	0.8713	-0.210	0.0588	0.269	Yes
AS	0.1945**	-0.4019	0.6679	1.0698	0.1200	0.2779	0.157	Yes
AL	0.1298*	-0.9172	1.2072	2.1244	-0.056	0.3369	0.393	Yes
ALE	0.1218*	-0.1864	0.3933	0.5797	0.0319	0.2207	0.188	Yes
LP	0.0392*	-0.2827	0.4057	0.6884	-0.071	0.1501	0.221	Yes
AG	0.2370*	-0.2524	1.3992	1.6516	-0.027	0.4477	0.475	Yes
IN	-0.1146**	-0.3242	0.1669	0.4911	-0.188	-0.056	0.131	Yes
PTI	0.1638**	-0.0204	0.4349	0.4553	0.0729	0.2401	0.167	Yes
LUI	0.2798*	-0.4451	0.1799	0.625	-1.0026	1.7095	2.712	Yes
JI	0.0135**	-0.2939	0.3549	0.6488	-0.032	0.0607	0.093	Yes
Summary Statistics								
DIC		3378.42						
WAIC		3241.35						
Pseudo R2		0.758						
RMSE		55.32						
	GWNBR Model Result							
Variables	Mean. Est.	Min. Est.	Max. Est.	Rang[a]	Lwr. Est.	Upr. Est.	Delta[b]	Non-Stationary Test
Intercept	-4.327**	-15.922	2.391	18.31	-7.321	0.189	-1.60	Yes
Bus	0.019**	-0.041	0.042	0.083	-0.0008	0.003	0.015	Yes
AH	0.042*	0.011	0.062	0.051	0.023	0.047	-0.41	Yes
AS	-0.032*	-0.049	0.004	0.053	-0.073	0.002	0.64	Yes
AL	0.018**	0.009	0.036	0.027	0.016	0.015	0.641	Yes
ALE	0.191*	0.095	0.186	0.091	0.109	0.136	-0.41	Yes
LP	0.626*	0.193	0.635	0.442	0.284	0.318	0.39	Yes
AG	0.517**	0.365	0.894	0.529	0.424	0.641	0.745	Yes
IN	0.041**	-0.036	0.394	0.43	0.031	0.189	0.128	Yes
PTI	0.624*	-0.264	0.0371	0.301	-0.047	0.012	0.011	Yes
LUI	0.164**	0.036	0.631	0.595	0.083	0.284	-0.84	Yes
JI	0.495**	0.171	0.531	0.36	0.285	0.297	0.157	Yes
Summary Statistics								
DIC		3189.43						
WAIC		2945.31						
Pseudo R2		0.728						
RMSE		85.31						

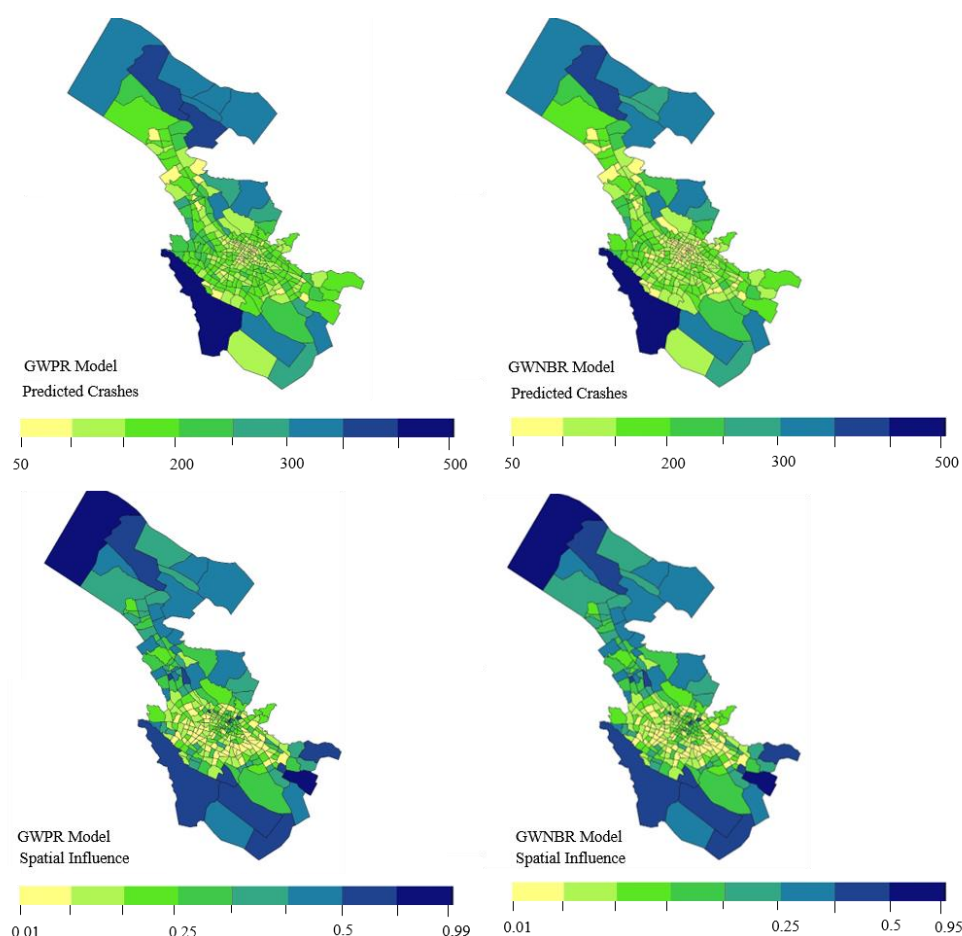
**significant at the 5% level
* significant at the 10% level
[a]Rang= Max. Est.- Min. Est.
[b]Delta =UpperEst .− LowerEst.; YES= Delta > 1.96 Std. Err. indicating the non-stationarity test was passed.

برآورد فراوانی تصادفات درون شهری به روش SW. جدول (۴)، نتایج برآورد فراوانی تصادف درون شهری براساس متغیرهای توضیحی به روش GWPR و GWNBR را نشان می‌دهد. پارامترهای هر دو مدل مجاز هستند در فضا تغییر کنند و برای هر TAZ مقادیر متفاوتی دارند. بنابراین مقادیر نشان داده شده در بازه‌ای از تغییرات در سطح کل شهر شیراز را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده است پارامترها در هر دو مدل GWNBR و GWPR سطح معناداری ۱۰ درصد را پاس کرده‌اند اما در مدل GWNBR پارامترهای مدل با سطح معناداری ۵ درصد بیشتر از مدل GWPR مشاهده شده است. از طریق آزمون غیر ایستایی، همه پارامترها دارای تغییرات فضایی قابل‌توجهی هستند که مطالعات گذشته این خاصیت فضایی داده‌های تصادف را تأیید کرده است.

در جدول (۴) در مدل GWPR بازه تغییرات ضریب متغیر ایستگاه اتوبوس در کل مطالعه از حداقل (0.294-) تا حداکثر (0.655) مجاز به تغییر در فضا بوده است که نشان می‌دهد تحت تأثیر اثر فضایی در هر یک از TAZها این متغیر به چه میزان در رخداد تصادفات تأثیر گذار بوده است. این مقدار از میزان مشابه در مدل GWNBR بیشتر به دست آمده است (حداقل 0.041- و حداکثر 0.042) بنابراین نشان می‌دهد در مدل GWNBR به دلیل تعدیل اثر بیش پراکندگی داده‌ها میزان اثر فضایی به حداقل رسیده است، همچنین حداکثر بازه تغیرات ضرایب متغیرهای مستقل در مدل GWPR مربوط به متغیر AL(Rang: 2.124) و حداقل آن مربوط به PTI (Rang: 0.455) به دست آمده است که این میزان تغییرات در مدل GWNBR به طور قابل توجهی کمتر به دست آمده است (حداکثر INT Rang:0.595 و حداقل AL Rang:0.027). بنابراین براساس نتایج تحقیق در مدل GWPR متغیر AL در TAZهایی که اثر فضایی محسوس است (مانند شمال و جنوب شهر شیراز) بالاترین تأثیر را در رخداد تصادف دارد که با مطالعه همخوانی دارد.

در TAZهایی که اثر فضایی کمتر مشاهده می‌شود (مرکز شهر شیراز) تأثیر زمان سبز چراغ بر رخداد تصادف در هر دو مدل GWPR و GWNBR بیشتر از سایر متغیرها می‌باشد. در هر دو مدل نشان داده شده است که تمامی شاخص‌های ایجاد شده در این مطالعه در رخداد تصادفات درون شهری تأثیرگذار بوده‌اند که از بین آنها شاخص تنوع کاربری تأثیر بالاتری در رخداد تصادفات درون شهری داشته است که مطالعات همخوانی دارد.

شکل (۲) نتایج پیش‌بینی فراوانی تصادفات درون شهری و همچنین اثر فضایی در هر یک از TAZها به روش SW را نشان می‌دهد.



شکل ۲ برآورد فراوانی تصادفات درون شهری و اثر فضایی متغیرهای مستقل به روش SW

در روش GWPR اثر فضایی در کل محدوده مطالعه مشاهده شده است که بیشترین آن در قسمت شمال و جنوب شهر است اما در روش GWNBR اثر فضایی در مناطق شمال و جنوب شهر تمرکز دارد و در سایر مناطق مقادیر آن کمتر به دست آمده است بنابراین در مدل GWNBR اثر فضایی با استفاده از بیش پراکندگی کمی کاهش یافته است. در هر دو مدل نشان داده شده است که اثر فضایی در TAZهای مرکز شهر کمتر از سایر مناطق شهری است به طوری که در بسیاری از TAZهای واقع در مرکز به سمت جنوب شهر اثر فضایی نزدیک به صفر به دست آمده است که می‌توان دریافت اثر فضایی در مناطق مرکزی تأثیر کمتری در برآورد ضرایب متغیرهای مستقل داشته است. براساس مقادیر به دست آمده در جدول (۳) مدل GWNBR براساس مقادیر WAIC، DIC، RMSE (مقادیر کمتر و برازش بهتر) نیکویی برازش بهتری نسبت به مدل GWPR دارد.

برآورد فراوانی تصادف درون شهری به روش SA. استنتاج بیزی بر اساس فاصله چگالی خلفی پارامترها است که معمولا به عنوان فاصله اعتبار بیزی (CI) شناخته می‌شود. یک CI 95% که شامل مقادیری بین ۲,۵ و ۹۷,۵ درصد توزیع احتمال پسین است، معمولا برای تعیین اعتبار یک متغیر استفاده می‌شود. اگر CI ۹۵٪ یک پارامتر حاوی صفر نباشد، آن پارامتر معتبر است. یک پارامتر معتبر تأثیر مثبت (یعنی افزایشی) بر فرکانس تصادف دارد اگر دو حد از پارامتر در CI ۹۵٪ بزرگتر از صفر باشد. به طور مشابه، اگر دو حد از پارامتر در CI ۹۵٪ کمتر از صفر باشد، یک پارامتر معتبر تأثیر منفی (به عنوان مثال، کاهش) بر فرکانس تصادف دارد.

جدول (۵) نتایج مدل‌سازی برآورد فراوانی تصادفات درون شهری به روش SA را نشان می‌دهد که در آن پارامترهای که در سطح ۹۵٪ معنادار شده‌اند با رنگ قرمز برجسته شده‌اند. با در نظر گرفتن میانگین‌های خلفی متغیرهای کمکی، به طور کلی نتایج نشان داده است روابط بین متغیرهای مستقل انتخاب شده و فراوانی تصادفات با استفاده روش SA به خوبی برقرار شده است که مطالعات قبلی آن را پشتیبانی می‌کند.

در هر دو مدل، اثر فضایی (Spatial Precision) مقدار مثبت به دست آمده است که نشان می‌دهد اثر فضایی در کل محدوده مورد مطالعه مشهود است و در برآورد ضرایب متغیرهای مستقل تأثیرگذار بوده است. در هر دو مدل، میانگین خلفی (posterior) برای تعداد ایستگاه‌های اتوبوس مثبت است. این نتیجه منعکس کننده انتظاراتی است که افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس باید احتمال تصادف را افزایش دهد. بنابراین منطقی است که TAZهایی که تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بیشتری نیز داشته باشند تعداد تصادف بیشتری داشته باشند که با مطالعه [32] همخوانی دارد. یک نتیجه دور از انتظار، میانگین خلفی منفی PTI است که در هر دو مدل مشاهده شدکه نتیجه مطالعه [33] آن را تأیید می‌کند و با مطالعه [34] همخوانی ندارد. میانگین خلفی متغیر LUI در این مطالعه مثبت به دست آمده است که نشان می‌دهد افزایش تنوع نوع کاربری در TAZ باعث افزایش فراوانی تصادفات می‌گردد که با مطالعه [25] سازگاری دارد بنابراین افزایش تنوع کاربری در TAZ به دلیل تداخل انواع سفرها در یک محدوده خاص باعث رخداد تصادف می‌گردد.

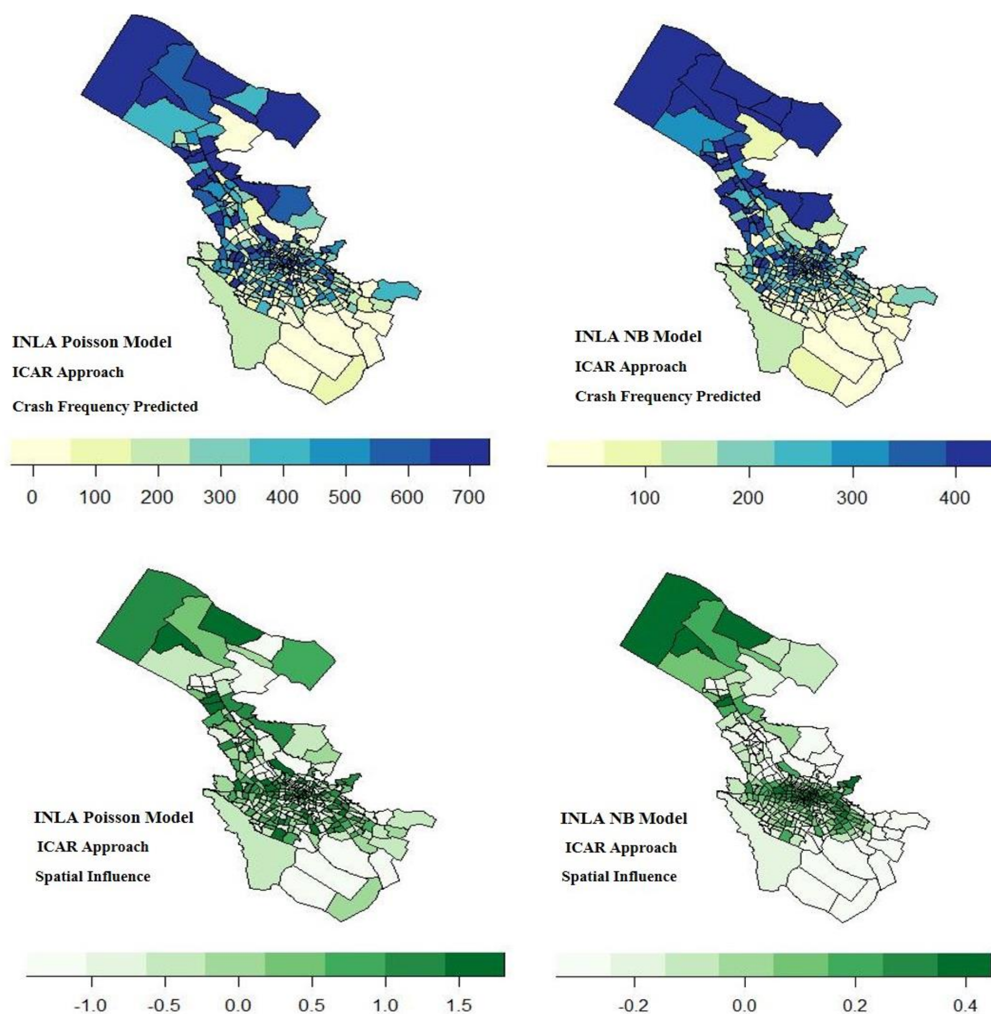
همان گونه که مورد انتظار بود متغیر AS در رخداد تصادف در هر دو مدل مثبت به دست آمد بنابراین نشان می‌دهد افزایش سرعت در TAZ افزایش فراوانی تصادف را به دنبال دارد که با مطالعات گذشته همخوانی دارد [35]. یکی از مهمترین متغیرهایی که ارتباط مثبت با رخداد تصادف دارد متغیر AL به دست آمده است که مطالعات [36] آن را تأیید می‌کند. تأثیر تعداد خط عبوری بر رخداد تصادف را نشان داده است همچنین ارتباط بین فراوانی تصادفات و متغیرهای IN و AG در هر دو مدل مثبت به دست آمده است که البته نسبت به سایر متغیرها مانند AS و AL تأثیر کمتری دارند بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش تعداد تقاطعات و افزایش زمان سبز در هر TAZ تعداد تصادفات در آن TAZ افزایش یابد که با مطالعه [37] همخوانی دارد. به طور کلی از ۱۲ متغیر مستقل این مطالعه در هر دو مدل SAP و SANB روش INLA تعداد ۸ متغیر معنادار بوده‌اند که نشان دهنده تأثیر قابل قبول متغیرهای انتخابی بر رخداد تصادفات درون شهری است. به صورت مقایسه‌ای می‌توان گفت در TAZهای که تعداد ایستگاه اتوبوس بیشتر و تنوع کاربری بیشتر و همچنین سرعت وسایل نقلیه بیشتر است احتمال رخداد تصادف در آن بیشتر است نسبت به TAZهای که مقادیر ضریب میانگین خلفی این سه متغیر کمتر از سایر TAZها گزارش شده است این نوع مقایسه در مطالعات [23] دیده شده است.

جدول ۵ نتایج مدل‌سازی پواسون و NB به روش INLA فضایی

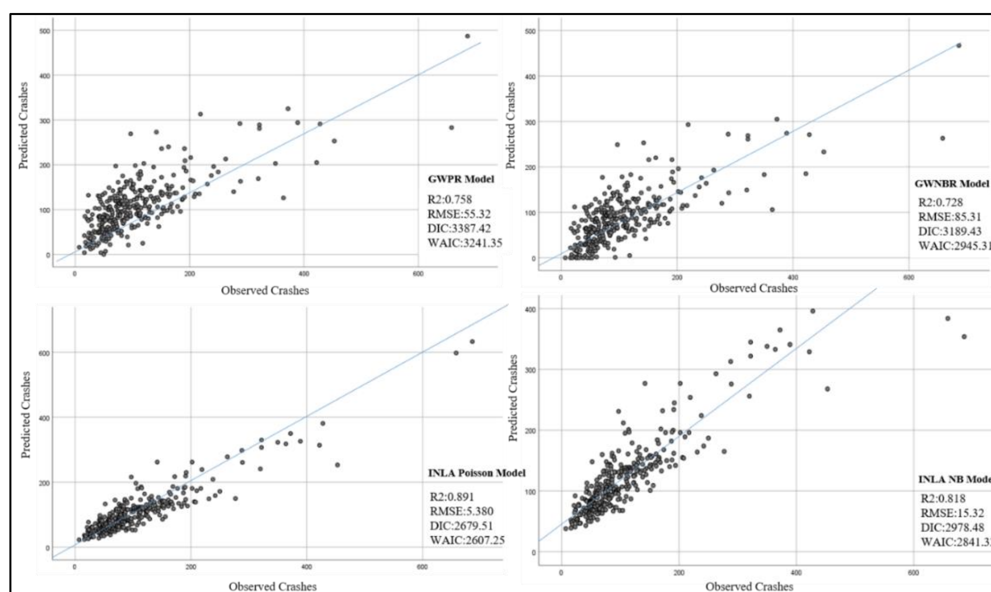
Variables	PO				NB			
Statistic	Mean	SD	95% CI		Mean	SD	95% CI	
Spatial Precision	5.3561	0.6882	4.0433	6.7305	5.3561	0.6882	4.0433	6.7305
Beta0	2.9922	0.22033	2.561102	3.426433	2.9922	0.2203	2.5611	3.4264
BS	0.0442	0.00941	0.025885	0.062827	0.0442	0.009	0.0258	0.0628
AH	-0.010	0.00701	-0.02379	0.003742	-0.010	0.0070	-0.023	0.0037
AS	0.1412	0.03376	0.074868	0.207458	0.1412	0.0337	0.0748	0.2074
AL	0.22486	0.05816	0.110609	0.339025	0.22486	0.0581	0.1100	0.33902
ALE	0.00892	0.00650	-0.00388	0.021682	0.00892	0.0065	-0.003	0.02168
AG	0.0906	0.03535	0.05978	0.12097	0.0901	0.0354	0.019	0.1202
IN	0.07958	0.01436	0.051427	0.107853	0.07958	0.0143	0.0514	0.10785
PTI	-0.0499	0.12275	-0.2829	-0.009356	-0.0499	0.1227	0.082	0.1993
INT	0.0814	0.03099	0.02249	0.149252	0.0614	0.0309	0.012	0.1492
JI	0.10890	0.11606	-0.12603	0.330095	0.10890	0.116	-0.126	0.33009
LP	0.05835	0.04601	-0.03188	0.148882	0.05835	0.0460	-0.031	0.14888
Summary Statistics								
DIC		2679.51			2978.48			
WAIC		2607.25			2841.32			
Pseudo R2		0.891			0.818			
RMSE		5.380			15.32			

شکل (۳) نتایج برآورد فراوانی تصادف در سطح TAZ به روش SA را نشان می‌دهد همچنین مقادیر اثر فضایی در هر یک از TAZ در برآورد مدل فراوانی تصادف نشان داده شده است. در مدل SAP بین (1-تا 1.5) در کل محدوده مورد مطالعه متغیر است. در TAZهای با رنگ سبز پر رنگ (قسمت شمال و مرکز شهر) اثر فضایی بیشتر از سایر TAZها مشاهده شده است که نشان می‌دهد برآورد فراوانی تصادفات در این نواحی تحت اثر فضایی بالا و مثبت بوده است به این معنی که اثر فضایی باعث تشدید احتمال رخداد تصادف گریده است. در حاشیه و جنوب شهر اثر فضایی نزدیک به صفر و منفی به دست آمده است، که نشان می‌دهد اثر فضایی تأثیر کاهشی بر احتمال رخداد تصادف در این نواحی داشته است. در مدل SANB نتایج مانند مدل SAP به دست آمده است (اثر فضایی مثبت در نواحی شمال و مرکز شهر) اما بازه اثر فضایی کمتر از مدل SAP است که دلیل آن می‌تواند در نظر گرفتن اثر بیش پراکندگی فضایی در SANB باشد.

مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌ها. براساس معیارهای ارزیابی در انتهای جدول (۴ و ۵) مقادیر DIC در مدل SAP در مقایسه با سه مدل دیگر کمتر به دست آمده است که نشان دهنده نیکویی برازش مدل است .همچنین مقادیر RMSE ،R2 ،WAIC نشان می‌دهد مدل‌های SA نتایج مناسبتری نسبت به مدل‌های مبتنی بر SW ارائه می‌کنند. اگرچه مقادیر R2 در همه مدل‌ها در بازه قابل قبولی قرار گرفته است اما مقادیر کمتر DIC و WAIC نشان داده است که مدل SAP برازش بهتری به داده‌ها داشته است و مدل مناسبتری برای برآورد فراوانی تصادفات درون شهری می‌باشد. آستانه اختلاف بین مقدار DIC در مقایسه بین مدل‌ها براساس مطالعه [23] ده در نظر گرفته شده است که در این مطالعه مقدار DIC در SAP اختلافی خیلی بیشتر از حد آسانه با سایر مدل‌ها دارد. علاوه معیارهای آماری مقایسه و ارزیابی مدل‌ها، مقادیر پیش‌بینی شده فراوانی تصادف توسط مدل‌های مبتنی بر SA نسبت به مدل‌های SW نزدیکی بیشتری به مقادیر مشاهده شده دارند که در شکل (۴) مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های SA و SW مقادیر قابل قبولی است. علاوه بر آن مقایسه نقشه‌های فراوانی تصادف پیش‌بینی شده در شکل (۲) (روش SW) و شکل (۳) (روش SA) با شکل (۱) (تعداد تصادفات مشاهده شده) نشان می‌دهد فراوانی تصادفات برآورد شده به مدل SAP به مقادیر مشاهده شده نزدیکتر است.



شکل ۳ برآورد فراوانی تصادفات درون شهری و اثر فضایی متغیرهای مستقل به روش SA



شکل ۴ مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های SA و SW

محدودیت‌های تحقیق. در این مطالعه به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات کافی و همچنین محدودیت‌های زمانی تحقیق متغیرهای مهمی که انتظار می‌رود در رخداد تصادفات درون شهری تأثیرگذار باشند مانند حجم ترافیک ورودی و خروجی به هر TAZ، سرانه مالیکت خودور خانوار، شرایط اقتصادی افراد ساکن در هر TAZ، نسبت تعداد تصادفات با دوچرخه یا عابر، وضعیت روسازی و لغزندگی و بازه سنی و تحصیلات افراد درگیر تصادف در نظر گرفته نشده است بنابراین انتظار می‌رود در مطالعات آینده ضمن بررسی میزان اثر هم‌خطی بین متغیرهای مستقل تأثیرگذار در برآورد فراوانی تصادف به روش چندعاملی فضایی، اثر فضایی هر یک از متغیرهای مذکور در برآورد فراوانی تصادفات درون شهری در نظر گرفته شود.

بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه به منظور بررسی اثر فضایی EIFs تصادفات درون شهری با استفاده از روش‌های آمار فضایی مبتنی بر فاصله اقلیدسی ماتریس وزن جغرافیایی (SW) و روش‌های مبتنی بر فاصله و همجواری (SA) انجام گرفته است. در گام اول مطالعه تمامی متغیرهای در دسترس جمع‌آوری گردید و با توجه به مطالعات گذشته فشرده‌سازی داده‌ها به منظور کاهش اثر هم‌خطی و خود هم‌بستگی بین متغیرهای مستقل به روش PCA انجام گرفت. در روش PCA شاخص‌های تنوع کاربری، دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی و دسترسی به مشاغل به عنوان دسته‌های عوامل محیطی غیر مستقیم در مدل‌سازی وارد گردید.

در تمامی مدل‌ها، مقادیر تعداد ایستگاه اتوبوس، متوسط سرعت، متوسط زمان چراغ سبز و همچنین شاخص تنوع نوع کاربری به عنوان مهمترین EIFs تصادف شناسایی شده‌اند که میزان اثر EIFs تصادف، براساس مقدار ضرایب به دست آمده به دلیل وجود اثر فضایی در هر TAZ متفاوت است بنابراین با کنترل این عوامل متناسب با مقدار آن در هر TAZ می‌توان اثر فضایی EIFs تصادف را در آن TAZ کاهش داد.

در این مطالعه از ۴ مدل آمار فضایی GWNBR، GWPR مبتنی بر فاصله اقلیدسی و مدل‌های SAP و SANB مبتنی بر فاصله همجواری با رویکرد INLA جهت برآورد فراوانی تصادفات درون شهری با در نظر گرفتن اثرات فضایی EIFs تصادف استفاده گردیده است. براساس نتایج مطالعه، برآورد فضایی EIFs تصادفات درون شهری در رویکرد همجواری (SA) به روش INLA نتایج بهتری را ارائه نمودند؛ به عبارتی دیگر برآورد ضرایب EIFs در روش هم‌جواری نتایج مناسبتری نسبت به همان برآورد در روش ماتریس وزن‌دار جغرافیایی (SW) دارد.

مقایسه بین مدل‌های آمار فضایی SA و SW تاکنون در مطالعات گذشته مشاهده نشده است این مطالعه نشان داده شد که در نواحی درون شهری در سطح TAZ به دلیل هم‌جواری و مرز مشترک در کل TAZها روش SA ضرایب EIFs را بهتر برآورد می‌کند. علاوه بر این در این مطالعه نشان داده شد اثر هم‌جواری می‌تواند تأثیر منفی در برآورد ضرایب EIFs داشته باشد به عبارت دیگر ممکن است اثر فضایی شدت رخداد تصادف در مدل فضایی را نسبت به مدل آمار کلاسیک کاهش دهد.

در این مطالعه در هر دو روش SA و SW کاهش اثرات فضایی در برآورد ضرایب EIFs در مدل‌های SANB کاملا محسوس بود که نشان می‌دهد در نظر گرفتن اثر بیش پراکندگی در برآورد مدل‌های SANB محدوده اثرات فضایی را کاهش داده است.

شناسایی EIFs تصادف پس از بررسی چند مرحله‌ای در این مطالعه در سطح نواحی می‌تواند یک عنصر سودمند برای تدوین سیاست‌هایی در حمایت از اقدامات کاهنده تصادفات درون شهری باشد. اصلاح ویژگی‌های ایستگاه‌های اتوبوس در مکان‌های نامناسب که باعث افزایش تنش (conflict) بین وسایل نقلیه می‌گردد، زمان‌بندی مجدد چراغ‌های راهنمایی و کنترل صحیح بر اقدامات تغییرات کاربری زمین در سطح شهر از جمله اقداماتی است که می‌تواند احتمال رخداد تصادف را نواحی شهری کاهش دهد.

سپاسگزاری

مراجع

1. N.M. Zafri & A. Khan, “A spatial regression modeling framework for examining relationships between the built environment and pedestrian crash occurrences at macroscopic level: a study in a developing country context,” *Geography and sustainability*, vol. 3, no. 4, pp.312-324, (2022).
2. M. Umair, I.A. Rana & R.H Lodhi, “The impact of urban design and the built environment on road traffic crashes: a case study of Rawalpindi, Pakistan,” *Case studies on transport policy*, vol. 10, no. 1, pp.417-426, (2022).
3. P. Chen & J. Zhou, “Effects of the built environment on automobile-involved pedestrian crash frequency and risk,” *Journal of Transport & Health*, vol. 3, no. 4, pp. 448-456, (2016).
4. N.M. Zafri, A.A. Prithul, I. Baral & M. Rahman, “Exploring the factors influencing pedestrian-vehicle crash severity in Dhaka, Bangladesh,” *International journal of injury control and safety promotion*, vol. 27, no. 3, pp. 300-307, (2020).
5. S.A Almasi & H.R. Behnood, “Exposure based geographic analysis mode for estimating the expected pedestrian crash frequency in urban traffic zones; case study of Tehran,” *Accident Analysis & Prevention*, pp. 168-179, Apr 4-11, (2022).
6. L. Fuentes, R. Truffello & M. Flores, “Impact of Land Use Diversity on Daytime Social Segregation Patterns in Santiago de Chile,” *Buildings*, vol. 12, no. 2, pp.149, (2022).
7. C.D. Kang , “The S+ 5Ds: Spatial access to pedestrian environments and walking in Seoul, Korea,” *Cities*, vol. 77, no. 3, pp. 130-141, (2018).
8. M. Lake & L. Ferreira, “Towards a methodology to evaluate public transport projects”, 2002.
9. S.H. Yoon, Y.W. Kim & Y.G. Ji, “The effects of takeover request modalities on highly automated car control transitions,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 123, no. 1, pp. 150-158, (2019).
10. T. Chen, N. Sze, S. Chen, S. Labi & Q. Zeng, “Analysing the main and interaction effects of commercial vehicle mix and roadway attributes on crash rates using a Bayesian random-parameter Tobit model,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 154, no. 1, pp. 8-15,(2021).
11. A.P. Tarko, “Maximum likelihood method of estimating the conflict-crash relationship,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 179, no. 1, pp. 12-19, (2023).
12. M.H. Rashidi, S. Keshavarz, P. Pazari, N. Safahieh & A. Samimi, “Modeling the accuracy of traffic crash prediction models,” *IATSS Research*, vol. 46, no. 3, pp. 345-352, (2022).
13. M. Moomen, M. Rezapour, M. Raja & K. Ksaibati, “Predicting downgrade crash frequency with the random-parameters negative binomial model: Insights into the impacts of geometric variables on downgrade crashes in Wyoming,” *IATSS Research*, 44(2), vol. 44, no. 2, pp. 94-102, (2020).
14. H. Tang & E.T. Donnell, “Application of a model-based recursive partitioning algorithm to predict crash frequency,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 132, no. 1, pp. 105-116, (2019).
15. H. Huang, Q. Zeng, X. Pei, S. Wong & P. Xu, “Predicting crash frequency using an optimised radial basis function neural network model,” *Transportmetrica A: transport science*, vol. 12, no. 2, pp. 330-345, (2016).

16. M. Zarei, B. Hellinga & P. Izadpanah, “CGAN-EB: A non-parametric empirical Bayes method for crash frequency modeling using conditional generative adversarial networks as safety performance functions,” *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 35-46, (2022).
17. S.A. Almasi, H.R. Behnood & R. Arvin, “Pedestrian crash exposure analysis using alternative geographically weighted regression models,” *Journal of advanced transportation*, vol. 2021, no. 1, pp. 50-63, (2021) .
18. A.K. Al-Aamri, G. Hornby, L.C. Zhang, A.A. Al-Maniri & S.S. Padmadas, “Mapping road traffic crash hotspots using GIS-based methods: A case study of Muscat Governorate in the Sultanate of Oman,” *Spatial Statistics*, 42, vol. 42, no. 1, pp. 78-85, (2021) .
19. J. Liu, A. Hainen, X. Li, Q. Nie & S. Nambisan, “Pedestrian injury severity in motor vehicle crashes: an integrated spatio-temporal modeling approach,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 132, no. 3, pp. 105-117, (2019).
20. A.E. Iyanda, R. Adeleke, Y. Lu, T. Osayomi, A. Adaralegbe, M. Lasode & A. M. Osundina, “A retrospective cross-national examination of COVID-19 outbreak in 175 countries: a multiscale geographically weighted regression analysis,” *Journal of infection and public health,* vol. 13, no. 10, pp.1438-1445, (2020).
21. Y. Zhou, X. Jiang, C. Fu, H. Liu & G. Zhang, “Bayesian spatial correlation ,heterogeneity and spillover effect modeling for speed mean and variance on urban road networks,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 174, no. 3, pp. 103-110, (2022).
22. U. Galgamuwa, J. Du & S. Dissanayake, “Bayesian spatial modeling to incorporate unmeasured information at road segment levels with the INLA approach: A methodological advancement of estimating crash modification factors,” *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, vol. 8, no. 1, pp.95-106, (2021).
23. D. Saha, P. Alluri, A. Gan & W. Wu, “Spatial analysis of macro-level bicycle crashes using the class of conditional autoregressive models,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 118, no. 1, pp. 166-177, (2018).
24. K.M. Peera, R.S. Shekhawat & C. Prasad, “Traffic analysis zone level road traffic accident prediction models based on land use characteristics,” *International journal for traffic and transport engineering (Belgrade)*, vol. 9, no. 4, pp. 376-386, (2019).
25. H. Sung, S. Lee, S. Cheon & J. Yoon, “Pedestrian Safety in Compact and Mixed-Use Urban Environments: Evaluation of 5D Measures on Pedestrian Crashes,” *Sustainability*, vol. 14, no. 2, pp.646, (2022).
26. F. Guo & D. Lu, “How many crashes does cellphone use contribute to? Population attributable risk of cellphone use while driving,” *Journal of safety research*, vol. 82, no. 4, pp. 385-391, (2022).
27. M. Rahmani, A. Lotfata, E. Zebardast, S. Rastegar, T.W. Sanchez, B.A. Goharrizi & S. Landi, “Land use suitability assessment for economic development at the provincial level: The case study of Yazd Province, Iran,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 87, no. 1, pp. 104-112, (2022).
28. X. Delclòs-Alió & C. Miralles-Guasch, “Looking at Barcelona through Jane Jacobs’s eyes: Mapping the basic conditions for urban vitality in a Mediterranean conurbation,” *Land Use Policy*, vol. 75, no. 1, pp. 505-517, (2018).
29. U. Olsson, “Generalized linear models: an applied approach: Lund,” Student litteratur, (2002).
30. A. R. da Silva & A.S. Fotheringham, “The multiple testing issue in geographically weighted regression,” *Geographical Analysis*, 48(3), vol. 48, no. 3, pp.233-247, (2016).

31. L. Barmoudeh, H. Baghishani & S. Martino, “Bayesian spatial analysis of crash severity data with the INLA approach: Assessment of different identification constraints,” *Accident Analysis* & *Prevention*, vol. 167, no. 1, pp. 106-118, (2022).
32. D. Mukherjee, K.R. Rao & G. Tiwari, “Built-environment risk assessment for pedestrians near bus-stops: a case study in Delhi,” *International journal of injury control and safety promotion*, vol. 30, no. 2, pp.185-194, (2022).
33. J. Su, N. Sze & L. Bai, “A joint probability model for pedestrian crashes at macroscopic level: Roles of environment, traffic, and population characteristics,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 150, no. 1, pp. 105-113, (2021).
34. D. Rojas-Rueda, M.J. Nieuwenhuijsen, H. Khreis & H. Frumkin, “Autonomous vehicles and public health,” *Annual review of public health*, vol. 41, no. 1, pp.329-345, (2020).
35. J. Stipancic, L. Miranda-Moreno, N. Saunier & A. Labbe, “Network screening for large urban road networks: using GPS data and surrogate measures to model crash frequency and severity,” *Accident Analysis & Prevention,* vol. 125, no. 2, pp. 290-301, (2019).
36. P. Álvarez, M. A. Fernández, A. Gordaliza, A. Mansilla & A. Molinero, “Geometric road design factors affecting the risk of urban run-off crashes,” *A case-control study. PLoS one*, vol. 15, no. 6, pp.50-64, (2020).
37. J. Lee, M. Abdel-Aty & I. Shah, “Evaluation of surrogate measures for pedestrian trips at intersections and crash modeling,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 130, no. 1, pp. 91-98, (2019).